**«УТВЕРЖДАЮ»**

Ректор

ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологически университет»

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ С.А. Кудж

«\_\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2021 г.

**Заключение**

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА - Российский технологически университет» по диссертационной работе Овчинникова Ивана Сергеевича на тему «Механические свойства изолирующих диэлектриков систем металлизации ИС», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

Диссертационная работа выполнена на кафедре Наноэлектроники Физико-технологического института государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский технологически университет», Министерства образования и науки Российской Федерации.

Овчинников Иван Сергеевич в 2014 г. окончил магистратуру Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики. Присуждена квалификация (степень) по направлению подготовки «Электроника и наноэлектроника», присвоена квалификация «магистр».

В 2020 году окончил аспирантуру ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» по направлению «Электроника, радиотехника и системы связи», присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

В период подготовки диссертационной работы был аспирантом кафедры Наноэлектроники Физико-Технологического Института ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2020 году МИРЭА - Российским технологическим университетом.

Научный руководитель – Воротилов Константин Анатольевич, доктор технических наук, директор Научно-образовательный центр «Технологический центр» РТУ МИРЭА.

**Выписка из протокола № 6 заседания кафедры наноэлектроники физико-технологического института федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет» от «25» 06 2021 года.**

**Присутствовали:** д.ф.-м.н., профессор Блантер Михаил Соломонович, д.т.н., профессор Буш Александр Андреевич, д.т.н. Воротилов Константин Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор Капустин Владимир Иванович, д.ф.-м.н., профессор Мишина Елена Дмитриевна, д.ф.-м.н., профессор Морозов Владимир Георгиевич, д.ф.-м.н., профессор Сигов Александр Сергеевич, д.ф.-м.н. Фетисов Леонид Юрьевич, д.ф.-м.н., профессор Фетисов Юрий Константинович, д.ф.-м.н., доцент Юрасов Алексей Николаевич, к.ф.-м.н. Шерстю Наталья Эдуардовна, к.т.н., доцент Певцов Евгений Филиппович, д.ф.-м.н., профессор Покатилов Вячеслав Серафимович, к.ф.-м.н. доцент, Сундеев Роман Вячеславович, к.ф.-м.н., доцент Хорин Иван Анатольевич.

Заседание вел заведующий кафедрой наноэлектроники академик РАН д.ф.-м.н, проф. Сигов Александр Сергеевич.

**Повестка дня**: О рекомендации к защите диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук научного Ивана Сергеевича Овчинникова «Механические свойства изолирующих диэлектриков систем металлизации ИС», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

**Слушали**: Выступление И.С. Овчинникова по материалам диссертационной работы. В ходе обсуждения были заданы следующие вопросы:

**Д.ф.-м.н. А.Н. Юрасов**:

В чем заключаются преимущества, предложенного Вами метода оценки механических свойств изолирующих материалов, перед существующими методами?

**Ответ**: Преимущества предложенного метода заключаются в значительном превосходстве метода АСМ в режиме количественного наномеханического картирования перед традиционными методами, как по латеральному разрешению, так и по разрешению по глубине измерений, что позволяет использовать его для оценки механических свойств диэлектриков в составе систем металлизации ИС.

**к.ф.-м.н. И.В. Гладышев**: Почему в своей работе Вы исследуете модуль Юнга , как основную характеристику механических свойств изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью, а не твердость?

**Ответ**: Модуль Юнга является ключевой характеристикой механических свойств изолирующих диэлектриков, применяемых в системах металлизации ИС. Согласно современным требования технологических процессов производства ИС материал с модулем Юнга меньшим 6 ГПа не может быть использован, так как он будет несовместим с такими ключевыми технологическими операциями как химико-механическая полировка и корпусирование ИС.

**к.т.н., доц. Е.Ф. Певцов**: Как полученные Вами результаты могут способствовать развитию технологии производства материалов и приборов электронной техники?

**Ответ**: Предложенные в 4 главе диссертационной работы оригинальный метод локализации скрытых дефектов диэлектрика в структуре системы металлизации позволяет использовать его в качестве инструмента для анализа отказов предсерийных образцов ИС, что позволит оптимизировать технологические процессы и повысить в итоге процент выхода годных изделий.

**к.ф.-м.н., доц. Л.Ю. Фетисов**: Поясните, в чем заключаются основные преимущества исследуемых Вами перспективных ПМО материалов для использования их в системах металлизации ИС?

**Ответ**: Применение подобных материалов в системе межуровневой изоляции выгодно отличается пере существующими типами материалов в первую очередь за счет возможности дальнейшего снижения диэлектрической проницаемости без потери прочности. Основная идея улучшения механических свойств этих материалов состоит в использовании углеродных мостиковых связей между атомами кремния. Кроме того, эти материалы пригодны для процесса субтрактивной интеграции, который не требует травления low-k диэлектрика.

**Председатель, академик РАН, д.ф.-м.н. А.С. Сигов:** Мы выслушали сообщение И.С. Овчинникова о работе над диссертацией и ее основных результатах. Следует отметить значительный личный вклад автора в большой объем выполненной экспериментальной работы, а также ее высокий уровень. Результаты работы опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, прошли аппробацю на российких и международны конференциях. На основании вышеизложенного предлагаю одобрить результаты работы И.С. Овчинникова над диссертацией и рекомендовать диссертацию к защите.

Заслушав и обсудив доклад Овчинникова Ивана Сергеевича, а также ознакомившись с текстом диссертации и автореферата кафедра наноэлектроники приняла следующее решение:

**Актуальность темы и направленность исследования**

Диссертационная работа Ивана Сергеевича Овчинникова посвящена актуальной проблеме исследования методом атомно-силовой микроскопии механических свойств пористых органосиликатных материалов, применяемых и разрабатываемых для использования в качестве изолирующего диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью в системах многоуровневой металлизации ИС.

Актуальность темы определяется потребностью индустрии микро- и наноэлектроники в новых изолирующих материалах с низкой диэлектрической проницаемостью, отвечающих высоким требованиям по механической прочности, для их успешной интеграции в существующие технологические процессы производства интегральных микросхем. В этой связи важной задачей является поиск новых методов оценки механических свойств изолирующих материалов, как на этапе разработки, так и в процессе диагностических испытаний.

В работе решаются задачи по исследованию особенностей и оптимизации применения метода атомно-силовой микроскопии в режиме количественного наномеханического картирования для оценки механических свойств изолирующих материалов. Определяется возможность использования метода АСМ для оценки дефектности и механических свойств изолирующих материалов в составе системы металлизации ИС. Исследуется температурная эволюция механических свойств перспективных изолирующих материалов для систем металлизации ИС – периодических мезапористых органосиликатов с различными мостиковыми связями.

**Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации**

Все результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором либо при его непосредственном участии. На все заимствованные положения даны ссылки.

Диссертантом совместно с научным руководителем д.т.н., директором Научно-образовательный центр «Технологический центр» РТУ МИРЭА Воротиловым К.А. проводился выбор темы, планирование работы, постановка задач исследований и обсуждение результатов работы.

Автор учувствовал в настройке и юстировке атомно-силового микроскопа Bruker, на котором были выполнены экспериментальные исследования по оценке механических свойств и топографии поверхности изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью. Исследования электрофизических и химических свойств образцов изолирующих диэлектриков методами спектральной эллипсометрии, ИК Фурье спектроскопии, а также оценка диэлектрической проницаемости с помощью LCR - метра выполнены при непосредственном участии автора в лаборатории Научно-образовательного центра «Технологический центр» РТУ МИРЭА. Также автором лично в лаборатории РТУ МИРЭА на двулучевой системе FEI QUANTA 3D получены поперечные сечения тестовых структур с нанесенным слоем изолирующего материала.

**Степень достоверности результатов исследований, проведенных соискателем ученой степени**

Результаты, полученные в диссертационной работе, расширяют известные исследования по данному направлению и при этом не противоречат уже известным результатам, приведенным в открытых источниках. Экспериментальные результаты получены на высокоточном оборудовании, что обеспечило их воспроизводимость при многократных (повторных) измерениях. Результаты прошли апробацию у широкой аудитории специалистов по данной тематике. Все вышеперечисленное свидетельствует о достоверности полученных результатов и сделанных на их основании выводах.

**Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих российских и международных конференциях:**

1. Российская научно-техническая конференция с международным участием. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике, в 2018, 2019 годах. (г. Москва).

2. Российской научно-технической конференции с международным участием Физико-технологического института РТУ МИРЭА, в 2020 году. (г. Москва).

3. XX International Sol-Gel Conference, в 2019 году (г. Санкт-Петербург).

4. Advanced Metallization Conference, в 2019 году (Токио, Япония).

5. V International Conference on Innovations in Non-Destructive Testing SibTest, в 2019, (г. Екатеринбург).

**Научная новизна результатов, изложенных в диссертации**

1. Впервые предложено и экспериментально обосновано применение метода атомно-силовой микроскопии в режиме количественного наномеханического картирования для анализа механических свойств пористых органосиликатных пленок, используемых в качестве изолирующих диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью в системах металлизации ИС. Показано, что данный метод обладает преимуществами по сравнению с используемыми методами измерений: локальность измерений и возможность получения карты поверхностного распределения модуля Юнга, независимость результатов от влияния подложки.

2. Обнаружен эффект увеличения силы адгезии зонда адсорбированной водой на гидрофильной поверхности пористой органосиликатной пленки и определены параметры сушки пленок для устранения ошибки измерений модуля Юнга.

3. Методом атомно-силовой микроскопии в режиме количественного наномеханического картирования впервые определена величина модуля Юнга low-k диэлектрика на различных участках структуры с металлическими проводниками, сформированной методом субтрактивной интеграции.

4. Разработан оригинальный метод определения скрытых дефектов в пленке low-k диэлектрика в структуре системы металлизации, основанный на анализе данных поверхностного распределения параметров упругости.

5. Впервые получены данные о температурной эволюции модуля Юнга органосиликатных пленок с различными органическими мостиковыми связями между атомами кремния, рассматриваемых в качестве перспективных материалов в ИС сверхвысокой степени интеграции.

Новизна работы в целом состоит в расширении существующего методологического аппарата направленного на оценку механических свойств и дефектности традиционных и перспективных изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью для систем металлизации ИС.

Ряд новых научных результатов, полученных в работе, выносятся на защиту:

1. Метод атомно-силовой микроскопии в режиме количественного наномеханического картирования позволяет получить карту пространственного распределения модуля Юнга в диапазоне 1-20 ГПа пленок и структур пористых органосиликатных стекол с низкой диэлектрической проницаемостью, применяемых в качестве изолирующего диэлектрика в системах металлизации интегральных схем и может быть использован при разработке новых и совершенствовании данных материалов.

2. В пористых органосиликатных пленках с малым содержанием концевых метильных групп (CH3/Si<0.6) адсорбированная вода оказывает влияние на рост силы адгезии зонд/образец, приводя к завышенным значениям величины модуля Юнга. Предварительная сушка образца при 200° С в течение 5 мин и более позволяет устранить влияние данного эффекта.

3. Метод атомно-силовой микроскопии в режиме количественного наномеханического картирования позволяет определить величину модуля Юнга органосиликатных пленок и соответствует данным наноиндентирования, но не имеет ограничений по толщине пленок, связанных с влиянием подложки, и может быть использован для определения механических свойств и скрытых дефектов изолирующего диэлектрика в структуре системы металлизации.

4. Введение в структуру органосиликатного стекла мостиковых метиленовых, этиленовых и фенильных групп приводит к увеличению модуля Юнга, при этом наибольший эффект оказывают фенильные группы. Рост температуры отжига таких пленок приводит к увеличению модуля Юнга и связано с процессами перестройки кремний-кислородного каркаса пленок.

**Практическая и научная значимость работы**

Полученные результаты свидетельствуют о том, что анализ упругих свойств изолирующих диэлектриков в составе ИС является важнейшей задачей при разработке новых и совершенствовании существующих технологий, а также повышения их функциональных и эксплуатационных характеристик. Метод атомно-силовой микроскопии в режиме количественного наномеханического картирования может быть использован для характеризации упругих свойств low-k диэлектриков в процессах межоперационного контроля и анализа отказов, а также представляет основу для дальнейших исследований материалов и процессов создания многоуровневых систем металлизации ИС. Наиболее важные практические результаты:

1. Методика определения модуля Юнга пористых органосиликатных lowk диэлектриков с одновременной регистрацией топографии поверхности, включающая выбор оптимальных параметров зонда, подготовку образца перед измерениями, интерпретацию полученных результатов.

2. Способ локализации скрытых дефектов в структуре диэлектрика, интегрированного в систему межуровневой металлизации ИС.

3. Данные о механических свойствах и их связи с составом и структурой перспективных видов low-k диэлектриков, разрабатываемых для использования в новых технологических схемах изготовления ИС сверхвысокой степени интеграции.

**Ценность научных работ соискателя ученой степени**

Диссертация представляет собой законченный научный труд, который вносит весомый вклад в технологию оценки механических свойств изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью, применяемых в системах металлизации ИС. Особую ценность представляет экспериментальное обоснование и оптимизация применения метода атомно-силовой микроскопии для оценки механических свойств и дефектности изолирующих материалов в составе систем металлизации ИС. Полученные практические результаты могут быть использованы для оценки механических свойств традиционных и перспективных изолирующих материалов на этапе разработки материалов и в процессе интеграции.

**Соответствие диссертации требованиям, установленным п.14 «Положения о присуждении ученых степеней»**

Диссертация Овчинникова И.С. прошла проверку на наличие неправомерных заимствований в системе «Руконтекст», в результате которой выявлено, что диссертация содержит 98,4% оригинального текста.

Специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа Овчинникова И.С.. соответствует специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники». (согласно пунктам 3 и 6 паспорта специальности).

* Разработка и исследование технологических основ создания и методов совершенствования материалов и приборов по п. 1.
* Исследование и моделирование функциональных и эксплуатационных характеристик оборудования, материалов и изделий по п. 1, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы эффективного применения.

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени**

По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, из них 5 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ и в базы данных Web of Science и Scopus, 1 из которых имеет квартиль Q1, а также 5 публикаций в сборниках тезисов и материалах всероссийских и международных научных конференций.

Публикации в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ и входящих в базы данных Web of Science и Scopus:

1. **Ovchinnikov I.S.**, Vishnevskiy A. S., Seregin D.S., Rezvanov A.A., Schneider D., Sigov A.S., Vorotilov K.A. and Baklanov M.R. Evaluation of mechanical properties of porous OSG films by PFQNM AFM and benchmarking with traditional instrumentation // Langmuir. – 2020. – V. 36(32). – P. 9377-9387 (IF: 3.557 Q1).

2. **Ovchinnikov I.S.**, Orlov G.A., Seregin D.S., Vishnevskiy A.S., Vorotilov K.A.and Sigov A.S. Mechanical properties of nanoporous organosilicate glass films for the use in integrated circuits interconnects // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2308(1). – P. 050003(1-6).

3. **Ovchinnikov I.S.**, Vorotilov K.A., Seregin D.S., Dalskaya G.Y. Detection of hidden defects in low-k dielectrics by atomic force microscopy // IOP Conference Series: Journal of Physics. – 2019. – V. 1327. – № 1. – P. 012011(1-5).

4. **Овчинников И.С.** Методы оценки механических свойств изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью // Российский технологический журнал. – 2021. – Т. 9. – № 2.

5. **Ovchinnikov I.S.**, Seregin D.S., Abdullaev D.A., Vorotilov K.A., Rezvanov A.A., Gvozdev V.A., Blomberg T., Veselov A.A. Mechanical Properties of Low-K Dielectric Deposited on Subtractively Patterned Cu Lines for Advanced Interconnects // Proc. of IEEE International Interconnect Technology conference IITC2021. – 2021. – P. 1037.

Публикации в сборниках трудов конференций

1. Vishnevskiy A., **Ovchinnikov I**., Seregin D., Storonkin V., Rezvanov A., Vorotilov K. Mechanical properties of porous sol-gel films // XX International Sol-Gel Conference (Sol-Gel 2019). – 2019. pp.448.

2. Seregin D., Vishnevskiy A., Orlov G., Storonkin V., **Ovchinnikov I**., Vorotilov K., Baklanov M. Temperature evolution of sol-gel PMO low-k films with different organic bridges, ADMETA-2019, Tokyo, Japan.

3. **Овчинников И.С.**, Серегин Д.С., Воротилов К.А., Резванов А.А. Измерение модуля юнга метил-модифицированных силикатов методом атомно-силовой микроскопии. // В сборнике: Российская научно-техническая конференция с международным участием. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике. Сборник докладов конференции. – 2019. С. 155-160.

4. Серегин Д.С., **Овчинников И.С**., Воротилов К.А. Измерение механических свойств пористых изолирующих диэлектриков методом атомно-силовой микроскопии. // В сборнике: Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике (РНТК ФТИ-2018) Сборник трудов конференции. – 2018. С. 178-184

5. **Овчинников И.С**., Орлов Г.А., Селиванов М.В., Серегин Д.С., Воротилов К.А. Влияние толщины пленки пористого low-k диэлектрика на результат оценки модуля юнга методом атомно-силовой микроскопии. // Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием Физико-технологического института РТУ МИРЭА. – 2020. – с. 161-165

**Председатель, академик РАН, д.ф.-м.н. А.С. Сигов:** поступило предложение одобрить результаты диссертационной работы Овчинникова И.С., рекомендовать работу к защите и принять соответствующее заключение:

Результаты голосования:

За – 15 чел.

Против – нет.

Воздержавшихся – нет.

**Кафедра наноэлектроники постановила:**

Диссертационная работа Овчинникова Ивана Сергеевича отвечает требованиям п.п. 9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении учёных степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям, так как является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний. Продемонстрированы возможности и оптимизирован метод атомно-силовой микроскопии в режиме количественного наномеханического картирования для оценки механических свойств изолирующих материалов с низкой диэлектрической проницаемостью. Предложенный метод может быть использован для определения механических свойств и скрытых дефектов изолирующего диэлектрика в структуре системы металлизации. Получены данные о температурной эволюции модуля Юнга перспективных материалов для систем металлизации ИС - органосиликатных пленок с различными органическими мостиковыми связями между атомами кремния.

Рекомендовать диссертационную работу Овчинникова Ивана Сергеевича на тему «Механические свойства изолирующих диэлектриков систем металлизации ИС» к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники», пункты паспорта специальности № 3, 6, в диссертационном Совете Д 212.131.02.

Зам. зав. кафедрой наноэлектроники А.Н. Юрасов

Ученый секретарь кафедры наноэлектроники Л.Ю. Фетисов